

# Coupling Approach of Uncertainty Analysis and Calculation in Hydrology and Water Resources

Minggang Du<sup>1</sup> Ziheng Duan<sup>2</sup> Shidong Li<sup>3</sup>

Hydrological and Water Resources Survey Bureau of Xiaolangdi Reservoir Area, Yellow River Conservancy Commission, Jiyuan, Henan, 459000, China

## Abstract

Uncertainty analysis and calculation in hydrology and water resources have special practical significance, which plays an important role and value in deepening the understanding of hydrological processes, improving the accuracy of hydrological models, promoting interdisciplinary integration, supporting scientific decision-making, improving water resource utilization efficiency, and optimizing engineering design and planning. Therefore, this study first analyzes the uncertainty analysis and calculation in hydrological and water resources, then explores the main ways of coupling uncertainty analysis and calculation, and finally proposes a coupling approach for uncertainty analysis and calculation in hydrological and water resources to provide theoretical reference for solving such problems, in order to promote the development of related work in hydrological and water resources uncertainty analysis.

## Keywords

hydrology; water resources; uncertainty analysis; coupling pathway

## 水文水资源中不确定性分析与计算的耦合途径

杜明岗 段子恒 李世栋

黄河水利委员会小浪底库区水文水资源勘测局, 中国·河南 济源 459000

## 摘要

水文水资源中的不确定性分析与计算具有其特殊的现实意义, 对于深化对水文过程的认知、提高水文模型的精度、促进多学科交叉融合、支持科学决策、提高水资源利用效率以及优化工程设计和规划等方面都具有重要的作用和价值。因此, 本次研究首先针对水文水资源中不确定性分析与计算进行剖析, 后探讨不确定性分析与计算耦合的主要途径, 最后给出一种水文水资源中不确定性分析与计算的耦合思路, 来为该类问题的解决提供理论层面的参考依据, 以期能推动水文水资源不确定性分析相关工作的發展。

## 关键词

水文; 水资源; 不确定性分析; 耦合途径

## 1 引言

水文现象的发生同时存在确定性与不确定性两种情况, 因此针对水文水资源问题的研究、分析、计算、评价及预测, 会同时应用到确定性与不确定性两种方法。相比确定性分析, 不确定性分析及计算的耦合难度更大, 且同时涉及到随机性、模糊性与灰色性三种概念。而由于这三种概念同时存在于研究的对象与问题中, 因此需要将各种不确定性分析方法结合起来, 即采用耦合途径分析计算水文水资源的不确定性, 以使计算结果的可靠性及有效性得到保障, 为水文水资源相关问题提供参考支持, 推动行业的发展与演化。

## 2 关于水文水资源中不确定性分析与计算的剖析

针对水文水资源不确定性进行的分析与计算, 能够帮助科研人员更深入地理解水文循环的物理过程和运行机理, 包括降雨、径流、蒸发、入渗等过程, 并能够揭示这些过程中固有的随机性和不可预测性。而通过对不确定性的量化研究, 能够有效评估水文模型的输入参数、模型结构及控制输出结果的不确定性, 进而为水文模型的改进提供科学依据, 提升模型的预测精度和可靠性<sup>[1]</sup>。此外, 水文水资源的不确定性研究也涉及到统计学、数学、计算机科学及环境科学等多个学科, 因此其研究程度的持续深入, 也能够促进这些学科在水文水资源领域的交叉融合, 进而推动水文科学的发展。

从广义的角度上来看, 水文水资源的不确定性分析能够为洪水预警、水资源管理、生态环境保护等领域的科学决

【作者简介】杜明岗(1987-), 男, 中国河南周口人, 本科, 工程师, 从事水文水资源、水文测验、水文勘测研究。

策提供重要参考依据。通过评估水文预报的不确定性,能够有效量化灾害发生的风险,并为应对措施的制定提供支持。此外,不确定性分析也可用于预测水资源的时空分布与变化趋势,进而为水资源的优化配置及高效利用提供参考,而在水利工程的设计、规划及运行管理中,同样需要借助水文水资源不确定性分析结果,考虑各种不确定性因素对工程安全、效益及运行成本的影响,并以这些内容为依据优化工程设计方案,提高工程的安全性及经济性<sup>[2]</sup>。

### 3 水文水资源中不确定性分析与计算耦合的主要途径

#### 3.1 简单混合

简单混合的原理是将某一特定水文问题分两部分内容分别解决,通常情况下这类水文问题包括对水文现象的分析、计算、预测及评估等。解决时会分别采用确定性方法与不确定性方法,而最终获得的结果则是两种方法结果的混合。这是水文水资源中不确定性分析与计算耦合常用的途径之一,在面临具有容许区间的水文水资源不确定性分析中较为常用。

简单混合的应用情况之一,是用来提升短期水文预报的精度。通常情况下针对短期的水文预报需求,会以确定性途径获取其结果,而获得的结果在精度上也能够满足预报的要求。但如果出现了流域条件异常或是其他情况,以这种方法获得的结果在精度上的表现就不太理想。在这种情况下为了提升预报精度,就需要针对预报误差建立不确定性误差分析模型,并通过该模型分析未来可能产生的误差值,并借助误差值校正确定性途径所获得结果的预报值,以这种方法能够在一定程度上提升预报的精度<sup>[3]</sup>。

另一种情况是由暴雨推求设计洪水。这种情况一般出现在暴雨资料相对充分,但实测洪水资料有效性、数量及质量无法推求出满足精度要求的设计洪水时,在这种情况下需要通过暴雨资料推求设计洪水。这是简单混合中混用确定性方法与不确定性方法的典型做法。整个推求过程中不确定性法被用于设计暴雨,确定性法则用于推求洪水的产、汇流。

还有一种情况是用于获取无资料地区的综合单位线。这里提到的单位线在水文学中应用广泛,是经由确定性途径推求获得的、具有表征流域特性的数理曲线。通常情况下水文学中是以实测暴雨洪水资料为基础,通过假定一些特定条件推演获得单位线的,但在总结了长期以来的经验及案例之后,发现单位线的洪峰、滞时、底长等众多要素,与流域中的自然地理特征存在不确定性关系。这就为采用不确定性分析法(即相关法)获取单位线创造了可能,可以尝试应用不确定性分析法,在单位线的要素与地理特征之间建立联系,由此获得的单位线则被称为综合单位线,这种类型的单位线则可用于获取无暴雨洪水资料地区的单位线。从这一点上来看,综合单位线也显著具有确定性法与不确定性法混合的特征。

#### 3.2 一般嵌入

一般嵌入中的嵌入,指的是需要以某种特定分析法的总体框架为前提,在该前提的基础上于框架中的某一部分嵌入另一种分析法,通过这种做法实现提高分析可靠性的目的。这就意味着一般嵌入会存在两种情况,譬如在不确定性分析法中嵌入确定性分析法,或是在确定性分析法中嵌入不确定性分析法。这种做法的难度要比简单混合更高。

水文学中针对可能最大降水估算惯于采用确定性分析法,譬如以水汽放大法计算最大降水,就是通过确定性的框架实现的。而为了获得最大降水,则需要获取地面可能最大露点,这是保障该框架充分应用的关键前提。地面可能最大露点可以根据地面露点间接推求获得,而在应用的过程中则需要将地面露点作为随机变量,因此针对地面露点的推求就必然要应用不确定性分析法,这是在确定性分析法中嵌入不确定性分析法的一种常见形式。

中国水文学在处理、计算各项问题的实践中,针对拥有某种设计标准总水量的计算惯于采用不确定性方法推求,之后根据实测资料,选取对应的分配过程作为典型。被作为典型的分配过程将被当做特定模式,用于分配满足设计标准的总水量,并获取具体的分配过程,在这方面的典型案例之一,就是求得频率为95%的设计枯水年水量分配过程。从其计算过程来看,这种做法显然是在不确定性法中嵌入确定性内容,其中总水量的获取是根据不确定性分析法实现,而水量分配过程则需要通过确定性分析法获得。

确定性的水量平衡嵌入随机解集也属于这种类别。随机水文学中的解集模型因其适用性强而得到广泛应用,这主要是因为这种解集模型以另一种角度实现了确定性分析法在不确定性分析法中的有效嵌入,譬如将确定性分析法用于确定水量平衡,而不确定性分析法则用于将总量随机解集成分量。以年降水量随机分成12个月降水量的计算为例,12个月中降水量的分配具有非常强的随机性,但无论如何分配,全部12个月降水量的总和必然与年降水量对等。由此可见这种对降水量的分解,在客观上会受到水量平衡确定性的支配,不仅反映出水文变化的客观特性,也使得解集结果的可靠程度大幅增加。

#### 3.3 复杂渗入

与复杂渗入相比,简单混合与一般嵌入只能算是水文水资源不确定性分析与计算的初级耦合,而复杂渗入则是不确定性分析与确定性分析两者的相互渗透,通过使两种分析法各自发挥自身的特色,以实现耦合作用的最大限度优化。从概念上来看,复杂渗入中两种分析法的耦合程度要显著高于简单的混合或嵌入,可能会出现确定性分析中有不确定性分析,而确定性分析中的不确定性分析又包含有确定性分析的情况,且这种情况可能是多点存在的,以实现一种方法在另一种方法机制中的深度渗透。

实时预报在预报精度上有着更高的要求,因此会基于

重要的新信息对预报值进行实时校正,这使得传统水文预报的技术盲区得到充分填补,其结果也能为作业预报提供更多支持。而实时预报之所以能产生这样的作用,在根本上是因为该预报方式实现了确定性法与不确定性法的紧密渗透,进而借此实现水文预报过程及实际情况的客观反映。以特定流域为例,可通过采用确定性法为这个流域建立暴雨洪水模型,或是由多个河段组成的河系汇流系统模型,而这些模型则可被用于构筑状态方程。在此基础上再应用卡尔曼滤波法(不确定性分析法中的一种典型方法),结合系统状态方程及系统观测方程(该状况下两种方程都会受到随机干扰)并应用现代随机估计理论,则可获得系统状态无偏差最小方差的估计结果。而这种估计理论就能够用于采集新的信息,并应用新信息实现状态向量的实时校正,从而发挥实时预报的作用。正是因为具有这种作用,卡尔曼滤波法在实时预报中获得了非常理想的实用效果。

复杂渗入的另外一种典型应用,是基于小波分析进行水文随机模拟。小波分析能够将变化复杂程度极高的水文序列(譬如以年、月、日为时间单位的水文流量序列)加以分解,使之形成不同尺度下的小波变换序列,而如果重新获得原水文序列,则可通过对这些小波变换序列进行重构实现。为了降低计算难度并提升结果精度,人类会尽可能避开对复杂原水文序列进行计算的情况,转而通过计算变化特性相对简单的变换序列,来研究水文现象的变化特性。从具体方法的应用方式、分析流程及结果特征等来看,小波变换属于典型的确定性方法,但在重构过程中引入随机组合,则又具有明显的不确定性法特征。考虑到不同尺度下的小波变换序列在进行过随机组合及重构之后,将会获得大量的随机模拟序列,因此这种方法也可视为确定性分析法与不确定性分析法的相互渗入,并因此代表了另一种复杂程度高且效应突出的耦合形式。

#### 4 水文水资源中一种不确定性分析与计算的耦合思路

考虑到水文水资源不确定性的分析与计算,必然大量涉及到水文计算对象的随机性,同时获取的资料也具有模糊性,以及模型结构及参数也会具有不同的灰色性表现。这就使得水文现象计算将会受到多种因素的影响,其随机性是客观存在的,也导致其整个计算过程中无论是前期获得的观测

资料,还是后续形成的调查成果,其结果都具有模糊性。由于这些情况在水文水资源不确定性分析中共同客观存在,因此就需要尽可能结合多种分析方法。而贝叶斯定理中则给出了借助先验密度函数及似然函数获取后验密度函数的计算方式,故如果对似然函数进行模糊似然函数处理,并将先验密度函数模糊为灰色先验密度函数,在此基础上进一步应用贝叶斯定理,将能够获得一种全新的耦合思路。

以流量预报为例,首先设定预报量为 $P$ ,做出的预报值为 $p$ ,那么就可以用先验概率密度函数 $g(P)$ 来表示 $P$ 的自然不确定性,而似然函数 $L(p/P)$ 则可用于表示预报本身的不确定性。将这些内容代入到贝叶斯定理中,可得:

$$f(P/p) = KL(p/P)g(P)$$

其中, $K$ 为常数; $f(P/p)$ 为后验密度函数。

在此基础上还需要进一步考虑信息不充分可能存在的影响,通过使 $g(P)$ 这一先验密度函数转换为灰色先验密度函数,同时要注意建立似然函数必然涉及到实测资料的获取,而实测资料本身具有一定的模糊性,因此需要将似然函数 $L(p/P)$ 处理为模糊似然函数。而为了确保该方案得到实施,则需要将 $g(P)$ 的灰色先验密度函数与 $L(p/P)$ 的模糊似然函数进行组合。结合统计学理论、模糊集理论及灰色系统理论,将水文信息的特点融合到统筹过程中,会发现这些问题在原则上是有着明确的解决思路的。但由于当下尚不具备成型的处理方法及实例,因此其结果仍需要进行进一步的研究及探索。

#### 5 结语

针对水文水资源的研究绝大多数情况下会面临模糊性、随机性与灰色性共存的情况,因此需要通过耦合途径分析水文水资源的不确定性。已有的耦合方法已经能够达到较深的层次,但在解决具体问题时还应注意如何实现耦合途径的有效应用,这关系到水文水资源分析的精度及可靠性,因此正确使用耦合途径就显得至关重要。

#### 参考文献

- [1] 余志成,王伟,宋月,等.长江流域水资源利用与航运发展协调性分析[J].人民长江,2023,54(12):120-127.
- [2] 王格芳,李梦程.黄河流域水资源与区域发展时空耦合研究[J].干旱区资源与环境,2023,37(2):8-15.
- [3] 袁汝华,臧艳秋.长江经济带经济发展与水资源环境耦合协调性实证分析[J].水利经济,2021,39(2):1-8.